

Fodor Gábor „Channel Estimation and Receiver Design in Single- and Multiuser Multiantenna Systems” című, az Akadémiai Doktori címet pályázó disszertációjáról

A gyakorlatilag minden nyelven MIMO-ként emlegetett diszciplína, nagyjából 20 évvel ezelőtti megjelenése óta folyamatos és – mondhatni – rohamos fejlődésben van, újabb és újabb területeket hódít meg. Az eredeti célkitűzés a pont-pont közötti, főként a mikrohullámú hírközlésben súlyos problémát jelentő többutas terjedés hatása ellen kidolgozott diverziti rendszerek minőségének javítása és alkalmazási területének szélesítése volt. Rendkívüli képességei azonban hamar kiderültek: alkalmazásával az átviteli rendszerek spektrális hatékonyság alakjában megjelenő kapacitása elképzelhetetlen arányban megnövekedett; a több-felhasználós változat megjelenését a jelen évtized tízes éveiben követte a Massive MIMO-nak nevezett rendszer, mely egyéb, jelentős előnyei mellett mobil hálózatok *hajlékonyságát* (scalability)¹ tette szinte korlátlaná. Ugyanebben az időben jelent meg a MIMO fogalom a vezetékes optikai hírközlésben (ez talán a *legmeglepőbb* eredménye a fejlődésnek). Napjaink a *milliméteres hullámú MIMO* kidolgozásának első szakaszát jelentik.

E kissé hosszúra nyúlt bekezdéssel azt akartam hangsúlyozni-előrebocsájtani, hogy milyen nagy mértékben *korszerű* az értekezés témaválasztása. Eredményei nagyrészt – explicite mindegyik – a MIMO rendszerek *fizikai rétegére* vonatkoznak; ez többé-kevésbé természetes, hiszen lényegében az egész MIMO-tudomány e réteggel foglalkozik.

A 98 oldalas angol nyelvű disszertáció egy-felhasználós és több-felhasználós rendszerek *felfelé* (uplink) irányának két összefüggő problémájával: a csatornabecsléssel és a vevő felépítésével foglalkozik. Hogy csak az uplinket vizsgálja, az indokolt, minthogy a két irány berendezései lényegesen eltérnek egymástól: a (mikrohullámú) mobil állomás legtöbbször egyetlen antennát alkalmaz, a bázisállomás pedig sokat, az összes kiszolgált mobilnak általában sokszorosát; a szükséges jelfeldolgozás nagy részét a bázisállomás végzi. Ugyancsak nem foglalkozik 1-nél több cellás hálózatokkal. Ezzel kapcsolatban egy helyütt a szerző is megjegyzi (a 3. fejezetben) hogy az további vizsgálatokat igényel majd. Természetesen ez elfogadható – hiszen a disszertáció vizsgálati köre, az abban elért eredmények bőségesen elérik-túlteljesítik a megkívánható mértéket. Konkréten a disszertáció összefoglaló, bevezetés és a téma háttérének taglalását követően 5 érdemi fejezetet tartalmaz, majd egy rövid fejezetet alkalmazásokról, végül ismét Summary-nak nevezve a tézisek felsorolását. Az általam *érdeminek* nevezett fejezetek felépítése olyan, hogy bevezetésként közli tárgyalandó témakört, majd a részeredményeket, és persze a végeredmény(ek)e)t; mindezek birtokában összefoglalja, értékeli az eredményeket. A bizonyításokat, azaz a formulák levezetését a fejezet-végi függelékek adják meg.

Konkréten:

A 3. fejezet – mintegy a tárgyalandó témák bemutatásaként – egy-felhasználós rendszerben vizsgálja a pilotra és adatátvitelre szolgáló erőforrások arányát (PDPR, Pilot-Data Power Ratio). Definiálja a csatornamodellt, annak becslését az általa *naívnak* nevezett elv alapján (amelyben a csatorna *tényleges* mátrixát ismertnek tekintik, ezt az 1 és 2 Eredményben használja fel).

¹ A magyar szakirodalom a *scaling*, *scalability* fogalmakat általában *skálázásnak*, *skálázhatóságnak* fordítja. Szerintem ilyen értelmű magyar szó nem létezik; *skála* a magyarban csak zenei szakszóként szerepel, annak, abból képzett szavaknak *mérték*, *méretarány* értelme nincsen. A *hajlékonyságot* jobb ötlet híján választottam.

Ennek függvényében meghatározza a kiegyenlítő általános formuláját, majd, további egyszerűsítő feltételekkel a Tézis 3.1-ben a kiegyenlített adat-szimbólumok átlagos négyzetes hibáját, lényegében a PDPR és a $\|\hat{\mathbf{h}}^H \hat{\mathbf{h}}\|$ függvényében ($\hat{\mathbf{h}}$ a csatornamátrix, $\hat{\mathbf{h}}^H$ annak hermitikus transzponáltja). A formula tartalmazza a csatorna csillapítását és a bázisállomás antennáinak számát, azokat korrelálatlannak tekintve.

A 4. fejezetben jelenik meg az az új koncepció, melyben a csatornabecslés és az adatátvitel hibáját (a (4.2) és a (4.6) formula vett-jel modellje alapján) a vevő együttesen kezeli; (a módszert a disszertáció *true MMSE*-nek nevezi). Sokfelhasználós rendszerben határozza meg egy-egy felhasználó vett jelének minimális négyzetes hibáját, paraméterként figyelembevéve a bázisállomás antennáinak számát (korrelálatlanként) és a szakaszcsillapítást. A fejezet két végeredménye a *detektor (zárt alakú) előállítása* és az *egyes felhasználók vett (adat)jelének négyzetes hibája*. A numerikus eredményekből például megtudjuk, hogy, ellentétben a naiv detektorral, az új megoldás alkalmazásával az optimális PDPR nem függ az antennák számától. (Elég meglepő eredmény.)

Az 5. fejezet címe szerint az antennák korrelációjának hatásával foglalkozik, de ennél több van benne. Egyebek között megtudjuk a pilot-jel két lehetséges struktúrájának (blokk illetve fésű) elhelyezését és működését sokvivős rendszerben, ennek kapcsán azt is, hogy mint lehet az erőforrás-arányt a megfelelőre beállítani. Végeredmény – az előző fejezetekhez hasonlóan – az *uplink vett jel négyzetes hibájának kifejezése*, ezúttal *tetszőleges korrelációs mátrix esetén*. Az eredmények azt is megmutatják, hogy egy bizonyos PDPR-nél a négyzetes hiba jelentősen függ a vevőantennák korrelációjától, illetve a hiba más PDPR-nél lesz minimális, a korrelációs mátrix függvényében.

A 6. fejezet fő témája – folytatva (történetesen meg is ismételve) – az előzőben hivatkozott leírást a kétféle pilot-elhelyezésről és már ezek felhasználásával a csatorna-információ LSE és MMSE becslését, egy-felhasználós rendszerben, naiv vevőt alkalmazva. Végeredmény az elérhető spektrális hatékonyság, a két hiba-becslési eljárás alkalmazásakor.

Végül a 7. fejezet ugyancsak a spektrális hatékonyságot állapítja meg, sok felhasználó és korrelált antennák esetében; ilyen módon ez a legösszetettebb a tárgyalta problémák közül. Eredményként bemutatja az alkalmazandó LSE becslőt, az adat-jel négyzetes hibáját megadó algoritmust, a szolgáltatott hibát és a spektrális hatékonyságot korrelálatlan és korrelált antennák esetén.

Az értekezés felépítése formájában is és tartalmában is kiváló: formájában, mert minden fejezet elején részletesen leírja a tárgyalandó téma jelentőségét és lényegét; tartalmában pedig, mert minden eredményét zárt, szimbolikus formulákkal adja meg, ami hozzájárul ahhoz, hogy a problémát és annak megoldását megértsük. Eredményeit minden esetben mind számított mind szimulációs eredményekkel numerikusan is bemutatja. Csak hab a tortán, de ide tartozónak vélem, hogy kiemeljem az 1.1 táblázatot, mely igen megkönnyíti az olvasást, összefoglalva az egyes fejezetek – mondhatnám – peremfeltételeit.

Az új módszerek, ezek alkalmazásával elért eredmények homogén tématerület létező problémáinak magas színvonalú, a gyakorlatban is használható megoldását adják. Ezek egyrészt mélyítik általános megértésünket a vizsgált típusú rendszerek működéséről, másrészt konkrét utasítást – vagy enyhébben: iránymutatást – adnak jobb minőségű berendezések tervezéséről, szabványosításáról.

Két hiányérzetem támadt, vagy talán inkább: két kérdést teszek fel:

1. Az értekezés címe az uplink vevő tervezését ígéri és az egész tárgyalás erre vonatkozik, a BS vevő tudja optimalizálni a PDPR-t, mely lényegében az egyetlen változtatható paraméter. Azonban ennek beállítása az MT adó feladata, effektíve ez állítja be a megfelelő erőforrásokat. Honnan tudja, hogy mit csináljon?

A kérdés némi részletezést megérdemel. A 7.7 szakasz 2. bekezdése egy fél mondatot szán erre: „setting the pilot power *by the terminal* is easy because the terminals continuously measure the path loss to the serving BS” (a kiemelések tőlem). Ez megválaszolja a kérdést, ha kikötjük, hogy TDD-t használunk, (ha jól olvastam, ez sehol nincs leszögezve; bár tekinthető akár magától értetődőnek is) továbbá, ha egyértelmű összefüggés van a mért csillapítás és a pilot konkrét elrendezése (setting) között, amit a terminál adója ismer. Hogy ez a kapcsolat tényleg *egyértelmű* –e, azt nem tudtam átlátni (például, hogy függ-e az uplink zajhoz adódó interferenciától; vagy a reciprocitás kalibrálásától.)

2. Előrehaladva, a disszertáció egyre több és több jelenséget vesz figyelembe, melyek figyelembevételére a vevőnek egyre bonyolultabb számításokat kell elvégezni. Mennyiben növelik ezek – ha egyáltalában – a számítások bonyolultságát? adott esetben ez határozhatja meg a mobil állomás megengedhető sebességét?

Egy harmadik, kevésbé jelentős kérdés: a 3. fejezetből következő I. Tézis – egyéb egyszerűsítő feltételezések mellett – a csatornát szélessávúnak (delay-spread nélkülinek) tekinti. Milyen haszna/előnye van ennek? és mennyiben szűkíti az eredmény érvényességét?

Alább néhány, a lényeget nem érintő, megjegyzés

Kicsit hiányzik a rövidítések-betűszavak jegyzéke

A 4. oldal előrebocsájtja az egyes fejezetek tartalmát, azok sorszáma azonban 1-gyel elcsúszott (sajthibának tekinthetjük).

A téziszfüzet 6. pontja felsorolja azt a nagyszámú publikációt, melyek a disszertáció eredményeit ismertetik. Noha a Doktori Szabályzatnak a téziszfüzetre vonatkozó követelményei explicite nem írják elő, szívesen láttam volna a publikációk és a tézisek összerendelését: hogy melyik melyikre vonatkozik.

Talán a szerző megenged egy terminológiai javaslatot. Ahogy a vonatkozó irodalomban látni véltem, a *multiuser MIMO* ellentétét inkább *point-to-point MIMO*-nak nevezik; ennek használatát javaslom. Hogy ez talán jobb a *single user*-nél, az abból is látszhat, hogy (a téziszfüzet 4.2 pontja) magyarázni kényszerül utóbbinak értelmét – *point-to-point* esetében ez egyértelműbb lenne.

Utolsó megjegyzésként: az erőforrások (mondanám: adaptív) megosztásának módja egyáltalában nem triviális; noha a disszertációban nincs kimondva, de ha a téziszfüzet 5. pontját jól értem, az 5. és 6. fejezetben leírt módszer ugyancsak a szerző műve. Ha így van, akkor érzésem szerint ez tézis-értékű eredmény. Miután az értekezés nem matematikai, hanem műszaki tárgyú, helye lehetett volna egy ilyen, műszaki megoldást adó tézisnek, mondjuk a IV. Téziscsoportban. Gondolom a szerzőt (talán túlzott) szerénysége tartotta vissza ettől.

Végül a tézisek értékeléséről.

Mind az öt téziscsoport eredményeit tézisértékű új tudományos eredménynek fogadom el.

Megjegyzem, hogy az I., a III. és a IV. a „naiv” vevőt használja, a II. és az V. összehasonlítja a naiv és a „valódi MMSE” vevőt. Az antennákat korrelálatlanak tekinti az I. a II. és a IV. téziscsoport, azok korrelációját is figyelembeveszi a III. és az V. Az I., III. és IV. téziscsoport egy-felhasználós, a II. és az V. több felhasználós rendszert vizsgál.

Kissé részletezve az értékelést:

Az I. Téziscsoport (noha új eredményt is tartalmaz) inkább a következők bevezetésére szolgál.

A II. Téziscsoportban vezeti be a „valódi MMSE”-nek nevezett vevő-struktúrát, részletesen kidolgozva annak megvalósítását, és számpéldáin bemutatva minőségjavító hatását. Ezt tartom a legfontosabb tézisnek, mely jelentősen továbbfejleszt(het)i a PDPR optimalizálásának technikáját.

A III., IV., és V. Téziscsoport érvényes kérdésekben jelentékenyen mélyítette el tudásunkat: új eredményeket ismertet az antennák korrelációjának figyelembevételéről, a pilot-szekvenciák két típusának működéséről illetve a PDPR optimális megvalósításáról és az elérhető spektrális hatékonyságról

Fentiek alapján a disszertáció nyilvános vitájának kitűzését feltétlenül javaslom. Javaslom továbbá Fodor Gábornak az Akadémia Doktora cím megadását.

2018. október 24.

Dr. Frigyes István
prof. emeritus
az MTA Doktora